1951—2020年阿富汗气候变化特征分析

迪丽努尔·托列吾别克， 姚俊强， 毛炜峄， 李淑娟， 陈 静， 马丽云
（中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局树木年轮理化研究重点实验室/
新疆树木年轮生态实验室，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要： 基于最新CRU TS V4.05格点资料，系统分析了1951—2020年阿富汗气候要素时空变化特征。结果表明：（1）阿富汗自西南向东北部分别为极端干旱、干旱、干旱-半湿润和湿润气候区，年平均气温及潜在蒸散量自西南部锡斯坦盆地向东北部瓦罕走廊地区递减，年降水量呈递增的空间分布。（2）近70 a，阿富汗年及四季平均气温表现为全区一致性地增加且西部增温率大于东部，其中春季的增温幅度最大；阿富汗降水量区域间及季节差异性大，年降水量呈微弱减少趋势[−0.43 mm·(10a)$^{-1}$]，空间表现为自西南向东北呈"减少-增加-减少"变化；降水集中的冬、春季，降水量为减少趋势。（3）阿富汗潜在蒸散量大，1951—2020年呈显著的增加[5.59 mm·(10a)$^{-1}$]，而空间变化与降水相反，中部兴都库什山年潜在蒸散量呈减少趋势；春、夏和秋季潜在蒸散量增加，冬季减少。（4）近70 a以来，干湿指数(AI)表征阿富汗干湿气候变化趋势不明显，以年际变化为主；空间变化表现为阿富汗西南部极端干旱的锡斯坦盆地干旱加剧，中部兴都库什山经历了"暖湿"化，而降水量最集中的瓦罕走廊地区呈"暖干"化；春季平均AI减小幅度最大，加剧了阶段性干旱风险。21世纪以来，阿富汗经历了气候暖湿化的时期，气温略增加，降水量急剧增多，而潜在蒸散量明显减小，尤以春季变化最为显著，这将对该地区农业生产、冰冻圈风险及水资源管理带来挑战。

关键词： 阿富汗；暖湿化；干湿指数；锡斯坦盆地；瓦罕走廊

气候变化是当今国际普遍关注的全球性问题，气候变化不仅引起水资源在时空上的重新分配，而且加剧了洪涝、干旱等极端气候事件的发生频率，进而破坏自然环境和生态系统平衡，并且对经济发展和人类生活也有深远的影响。因此，气候变化在区域、国家乃至全球的可持续发展中发挥重要的作用[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出，全球气候系统正经历着快速而广泛的变化[2]。20世纪中叶以来，人类活动造成的气候变化显著地改变了全球水循环[3]，这将对气候的干湿变化和水资源供需平衡产生重要影响。

阿富汗是位于亚洲中西部的内陆国家，由于特殊的地缘政治和恶劣的气候环境，制约着其社会经济和农牧业发展。阿富汗境内地形地貌复杂，东北斜贯西南为高原和山地，其中最大的山脉为兴都库什山，研究表明这一地区是阿富汗增温明显的区域[4]。阿富汗的北部和西南部分别为干旱-半干旱和沙漠气候区，位于阿富汗西南部的的锡斯坦盆地是世界上最干旱的地区之一。锡斯坦盆地由赫尔曼德河流域、哈蒙湿地及尾闾湖构成，赫尔曼德河水源来自于兴都库什山并且补给下游的哈蒙湿地和高盐度的尾闾湖[5-6]。哈蒙湿地为阿富汗西南部荒漠区的绿洲地带，该地人口众多日常生活用水和农业灌溉压力大，还面临上游水源补给不稳定以及与邻国水资源之争的问题[7]。

近年来，阿富汗气候变化问题受到关注，并开展了一系列研究。Rehana等[8]采用日本高分辨率逐日亚洲陆地降水(APHRODITE)格点资料分析了1951—2007年阿富汗及其7个农业气候分区的降水和气温时空变化，表明阿富汗北部、东北部和西部经历了以气温增加而降水减少为主的"暖干"期；而阿富汗南部、西南部和东部随着气温和降水的增加，经历了"暖湿"化。Aliyar等[9]基于APHRODITE资料研究得出，1951—2010年阿富汗东北部和西南

收稿日期： 2022-01-06； **修订日期：** 2022-04-07
基金项目： 国家自然基金项目(42171038，U1903113)；新疆气象局引导性计划项目(YD202207)
作者简介： 迪丽努尔·托列吾别克(1990-)，女，助理研究员，主要从事干旱区气候变化研究. E-mail: delnur9@126.com
通讯作者： 姚俊强. E-mail: yaojq1987@126.com

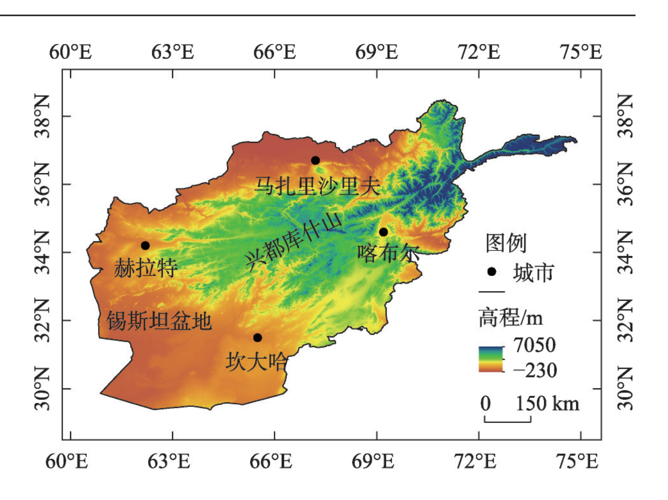
部年降水呈显著减少的趋势，持续干期增加，且春季更加明显。春季降水的减少会影响到春耕作物的生产，尤其是在可耕地面积占22%的阿富汗东北地区。与此相反的是在阿富汗中部、东部和南部区域夏季降水呈增加趋势，并且强降水和极强降水频次均呈增加趋势。近年来以增暖为主要特征的气候变化，以及干旱、沙尘暴、暴雪、极寒等的极端天气气候事件将给阿富汗的生态、农业、经济、生物多样性、人民健康和粮食安全带来巨大挑战[4]。

干湿气候变化对区域水循环与生态系统具有重要影响，同时也影响区域农业生产、经济发展和社会稳定[10]。干旱是阿富汗主要的气象灾害之一，Qutbudin等[11]研究表明，在1901—2010年阿富汗干旱强度增强、频次增加。在水稻和玉米生长季（5—11月），阿富汗西北部和西南部由于气温升高引起标准化降水蒸散指数（SPEI）的下降；在大麦种植季（10月至次年6月），升温和降水减少导致SPEI减小。随着全球增暖，阿富汗干湿气候变化格局发生了改变。为此，本研究基于最新的高分辨率逐月格点资料（CRU TS V4.05），系统分析1951—2020年阿富汗平均气候变化特征，并进一步分析干湿变化的基本情况，以期为阿富汗社会、经济、农业和生态环境建设提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

阿富汗为亚洲中部干旱区南部的内陆国家，地理位置位于29°35′~38°40′N，60°31′~75°E，毗邻6个国家，其北部与土库曼斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦接壤，西部与伊朗相接，东北部凸出的狭长地带（瓦罕走廊）与中国接壤，东南部与巴基斯坦相接[11]。地势西南低、东高（图1），北部和西南部多为平原，中部至东北部为山地，高原和山地占其全国面积的4/5。东北斜贯至西南为兴都库什山，其平均



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS（2021）5443号，对底图边界无修改。下同。

图1 阿富汗地形分布

Fig. 1 Distribution of topography over the Afghanistan

海拔为5000 m。兴都库什山是中亚气候的分水岭，东兴都库什山脉是亚洲季风区的最西边界，西兴都库什山脉是地中海气候的东边界[4,11]。阿富汗西南部的锡斯坦盆地为世界上最干旱的地区之一，常年受极端干旱气候和沙尘暴的侵袭[4]。

1.2 数据来源与处理

观测数据来自美国国家气候数据中心（NCDC）研发的全球历史气候数据集（Global Historical Climatology Network-Monthly, GHCN-M V4.0）[12-13]，该数据集是目前收录站点数量最多、时空覆盖范围最广的全球气候要素数据产品，被广泛应用于全球及区域气候变化研究中。阿富汗境内有5个气温和4个降水观测站点，对站点资料进行时间一致性检验以保证数据长度的稳定性和均一性，最终选取了4个站点（表1）。为方便进行统一对比分析，数据的时间范围为1964年1月—1982年12月。季节划分：3—5月为春季，6—8月为夏季，9—11月为秋季，12月至翌年2月为冬季。由阿富汗4个气象站点年和四季平均气温、降水量的分布，分析得到4个站点年平均气温为12.1~18.8 ℃，年降水量在170~310 mm，

表1 阿富汗站点信息

Tab. 1 The distribution of observation stations in Afghanistan

站名（站号）	纬度	经度	海拔高度/m	降水时间	温度时间
赫拉特（40938）	34.2°N	62.2°E	964	1964—1982年	1961—1988年
喀布尔（40948）	34.6°N	69.2°E	1803	1963—1991年	1958—1991年
坎大哈（40990）	31.5°N	65.5°E	1005	1964—1983年	1964—1986年
马扎里沙里夫（40911）	36.7°N	67.2°E	378	1964—1991年	1961—1991年

以春、冬季降水为主。

采用英国东英吉利亚大学气候研究中心重建的最新全球逐月气候要素格点资料(CRU TS V4.05)[14],时间范围覆盖为1901—2020年,空间分辨率为0.5°×0.5°。潜在蒸散量的计算采用世界粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,FAO)推荐的Penman-Monteith公式[15]。已有研究表明,CRU格点资料分辨率高、覆盖完整,并且与实测资料有很好的吻合性。闫昕旸等[16]基于CRU资料分析泛中亚干旱区气候变化特征,表明该格点资料在观测资料匮乏的泛中亚干旱区具有可靠性。陈发虎等[17]利用CRU资料分析中亚降水变化,表明1930年以后CRU资料在中亚具有适用性。于志翔等[18]采用CRU资料分析中巴经济走廊气候变化时空分布特征,利用瓜达尔港、红旗拉甫地面观测数据与CRU气温资料进行对比,结果表明站点与CRU插值数据拟合较好,相关系数高。确定CRU资料在位于阿富汗东南部的中巴经济走廊地区可靠性较高。分辨率高、长时间序列的CRU资料在气候变化和气候趋势等方面的研究中被广泛应用[16-22]。

为验证CRU资料在阿富汗地区的可靠性,采用双线性插值法将CRU逐月格点资料插值到阿富汗对应的站点(表1),选择线性回归[21]和皮尔逊相关系数(CC)[23]作为评价指标,当CC值越大,表明线性拟合程度越高。对比1964—1982年阿富汗4个站点月平均气温与CRU插值气温数据,结果表明两者相关系数为0.89,表现为强相关,且线性回归系数(0.85)近似于1。由此可见,CRU资料在阿富汗可靠性高,适用于分析其气候变化特征。

干湿指数(Aridity Index,AI)是表征气候干湿程度的指数,AI在全球和区域干湿气候变化研究中有广泛的应用[22,24-26]。其定义如下:

$$AI = PRE/PET$$

式中:PRE为降水量(mm);PET为潜在蒸散量(mm)。依据联合国环境规划署(UNEP)的定义[27],依据AI指数将干湿气候划分为5类:极端干旱区($AI<0.05$)、干旱区($0.05\leq AI<0.2$)、半干旱区($0.2\leq AI<0.5$)、干旱-半湿润区($0.5\leq AI<0.65$)和湿润区($AI>0.65$)。气候要素变化特征与趋势的分析计算主要采用线性倾向估计法和显著性检验等气候统计方法[23]。

2 结果与分析

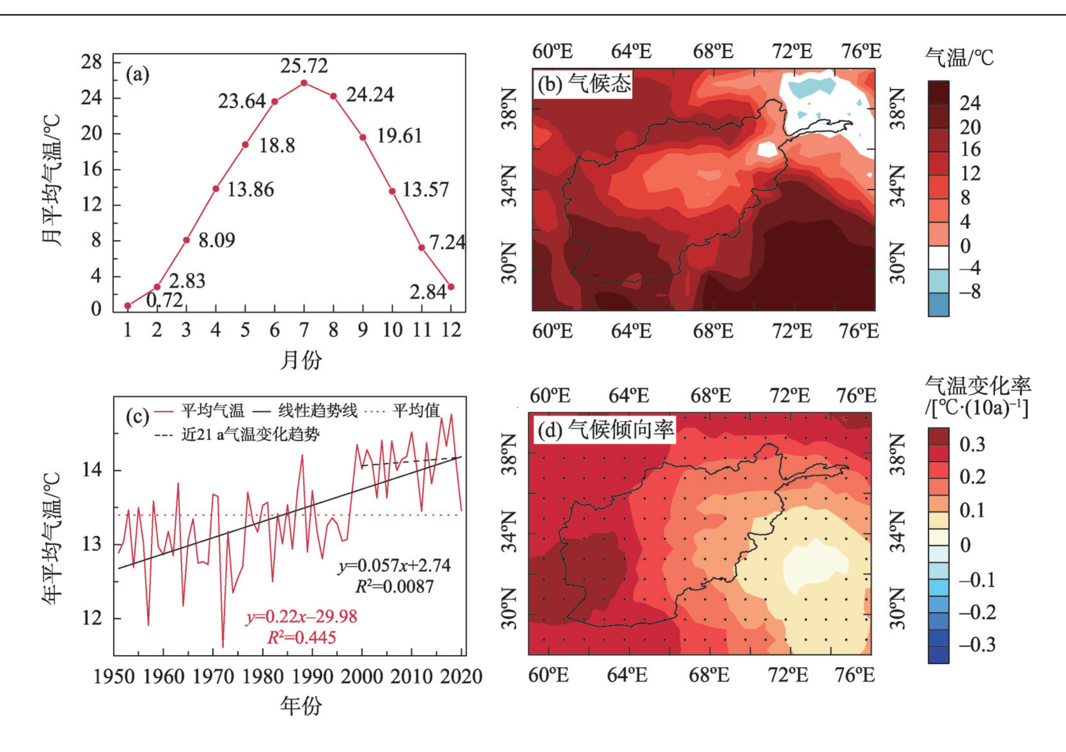
2.1 平均气温变化特征

由1951—2020年阿富汗区域平均气温的年内分布(图2a)可以看出,气温表现出明显的季节差异。月平均气温呈"单峰型"分布,阿富汗区域平均气温的最大值出现在7月,为25.7 ℃,最小值出现在1月,为0.7 ℃。1951—2020年阿富汗年平均气温自西北、西南部和东南部向东北部呈减小的分布,其中西南部年均气温高于24 ℃,中部年均气温在12 ℃以上,而兴都库什山地区年平均气温低于8 ℃,其中瓦罕走廊年平均气温低于0 ℃(图2b)。近70 a,阿富汗年平均气温呈显著上升趋势,其增温率为0.22 ℃·$(10a)^{-1}$,且通过95%水平的显著性检验。21世纪以来阿富汗平均气温增率为0.057 ℃·$(10a)^{-1}$(图2c)。从空间分布来看(图2d),1951—2020年阿富汗全区年平均气温呈显著的增温趋势(通过95%水平的显著性检验)。升温幅度自西向东递减,西部增温较明显,超过0.3 ℃·$(10a)^{-1}$。

1951—2020年阿富汗四季平均气温的时空变化如图3所示。阿富汗四季平均气温均自西南部向东北部随着海拔高度的增加呈下降的空间分布(图3a~图3d)。近70 a以来,阿富汗四季平均气温分别为13.6 ℃、24.5 ℃、13.5 ℃、2.1 ℃,四季平均气温的气候倾向率分别为0.29 ℃·$(10a)^{-1}$、0.23 ℃·$(10a)^{-1}$、0.22 ℃·$(10a)^{-1}$、0.12 ℃·$(10a)^{-1}$,且均通过95%水平的显著性检验(图3e~图3h)。春季增温幅度最大,冬季增温幅度最小。21世纪以来,夏、冬季平均气温呈明显的上升趋势,上升速率分别为0.48 ℃·$(10a)^{-1}$、0.16 ℃·$(10a)^{-1}$,且均通过95%水平的显著性检验。春、秋季平均气温下降趋势明显,气候倾向率分别为-0.21 ℃·$(10a)^{-1}$、-0.16 ℃·$(10a)^{-1}$。从四季平均气温变化趋势的空间分布(图3i~图3l)可以看出,1951—2020年阿富汗在春、夏季和秋季全区增温显著(通过95%水平的显著性检验),且平均气温变化率自西向东递减,阿富汗西部平原地区增温幅度较大。冬季东北部和西南部显著增温而中部增温不显著。

2.2 降水量变化特征

大气降水是阿富汗水资源的重要补给来源。阿富汗降水量季节分布不均,呈"双峰型"分布,四季降水量分别占年降水量的43.2%、6.8%、9.5%和



注:黑点表示变化趋势通过95%水平的显著性检验。下同。

图2 1951—2020年阿富汗平均气温月(a)、年际(c)变化以及其气候态(b)和气候倾向率(d)的空间分布

Fig. 2 Annual cycle (a) and interannual (c) variations and the spatial distribution of the annual average (b), trend (d) of temperature in Afghanistan from 1951 to 2020

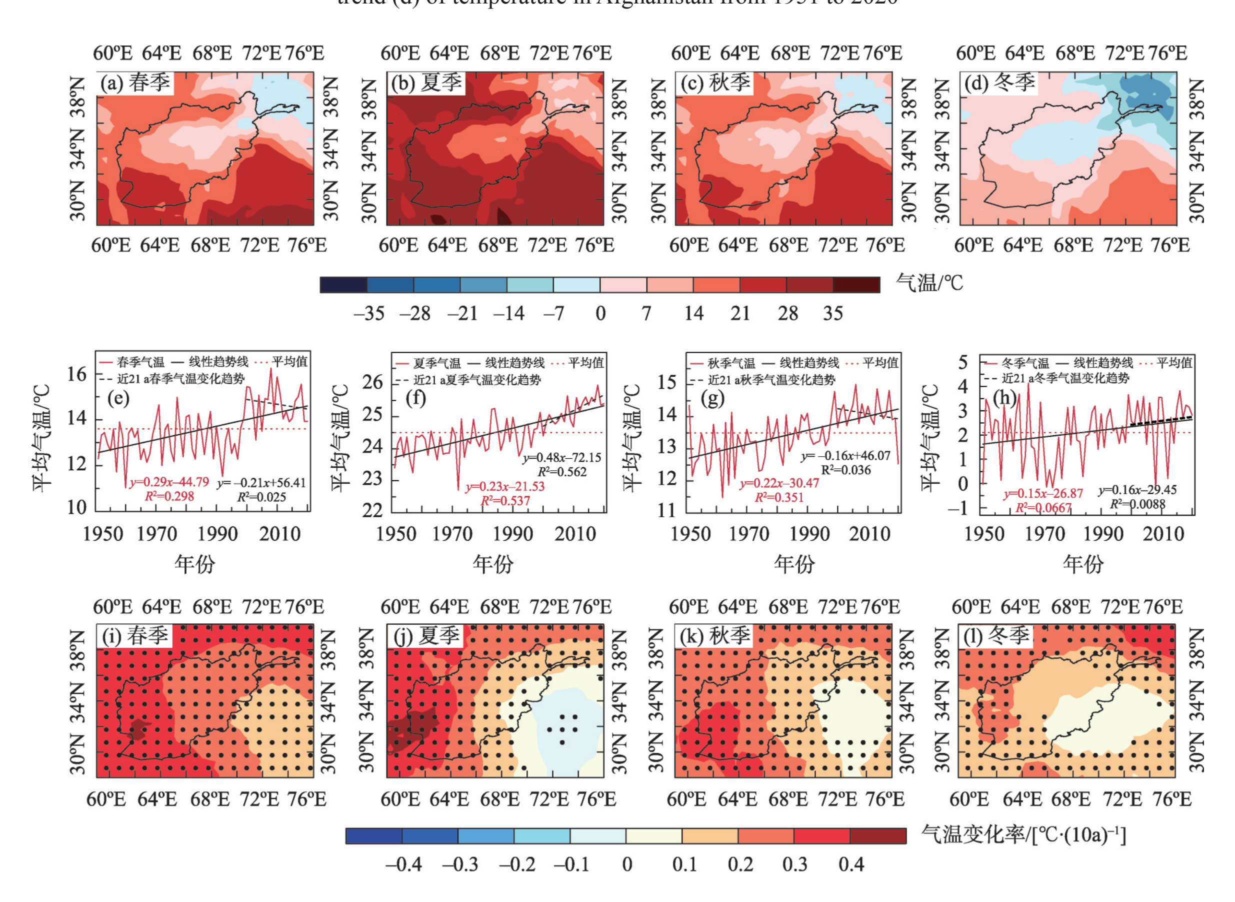


图3 1951—2020年阿富汗四季平均气温(a~d)及其气候倾向率(i~l)的空间分布和时间变化(e~h)

Fig. 3 Spatial distribution of seasonal average (a-d), trends (i-l), and temporal variations (e-h) of temperature in Afghanistan from 1951 to 2020

40.5%，月平均降水量最大值出现在3月(63.4 mm)，最小值出现在9月(3.6 mm)(图4a)。1951—2020年阿富汗年平均降水量的自西南部向东北部递增(图4b)。近70 a区域平均年降水量呈略下降趋势，气候倾向率为-0.43 mm·(10a)$^{-1}$，未通过显著性检验(图4c)。2000年以来阿富汗降水波动增加，2000—2020年间，平均每10 a增加36.5 mm，并且通过95%水平的显著性检验。从阿富汗年降水量变化趋势的空间分布(图4d)来看，近70 a以来，阿富汗年降水量变化趋势的区域间差异明显，表现为自西南部向东北部为"减少-增加-减少"的趋势。西南部和东北部降水量呈减少趋势，平均减少2 mm·(10a)$^{-1}$，而阿富汗中部年降水呈增加趋势。

图5a~图5d为1951—2020年阿富汗四季降水量的空间分布，可以看出，降水主要集中在春、冬季，且自西南部向东北部递增。近70 a以来，四季降水变化趋势不一致，降水量最集中的春、冬季呈减少趋势，平均每10 a分别减少0.74 mm、0.11 mm(图5e，图5h)；夏、秋季阿富汗降水呈增加趋势，平均每10 a分别增加0.29 mm、0.37 mm(图5f，图5g)。从空间分布来看，近70 a阿富汗春季降水量减少的区域主要分布在北部(图5i)，且东北部减少幅度大于2 mm·(10a)$^{-1}$，这一区域可耕地面积占阿富汗总面积的22%[9]，春季降水的减少将影响到该地区农作物的春耕春播。斯德哥尔摩环境研究所利用耦合模式比较计划(CMIP3)试验研究发现，1960—2003年阿富汗春季降水每10 a减少6.6%[28]，Aliyar等[9]研究结论也表明阿富汗春季降水呈减少趋势。冬季降水减少的区域在西南部和东北部，中部降水增加(图5l)。21世纪以来，阿富汗四季降水量气候倾向率分别为11.4 mm·(10a)$^{-1}$、-0.68 mm·(10a)$^{-1}$、1.12 mm·(10a)$^{-1}$、1.24 mm·(10a)$^{-1}$，春季降水量增加趋势最大，夏季降水量呈减少趋势。

2.3 潜在蒸散量变化特征

潜在蒸散量在水循环过程中对区域气候、生态环境和水资源配置状况都具有一定的影响[29]。阿富汗区域平均潜在蒸散量的年内分布呈"单峰型"，最大值出现在7月(224.5 mm)(图6a)。从空间分布来看(图6b)，阿富汗年潜在蒸散量大，且自西南部向东北部随着海拔的增加呈减小的分布。1951—2020年年潜在蒸散量呈显著的增加趋势(图6c)，其气候倾向率为5.59 mm·(10a)$^{-1}$(通过95%水平的显著性检验)。21世纪以来，年潜在蒸散量以-3.5 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈显著减少。由年平均潜在蒸散

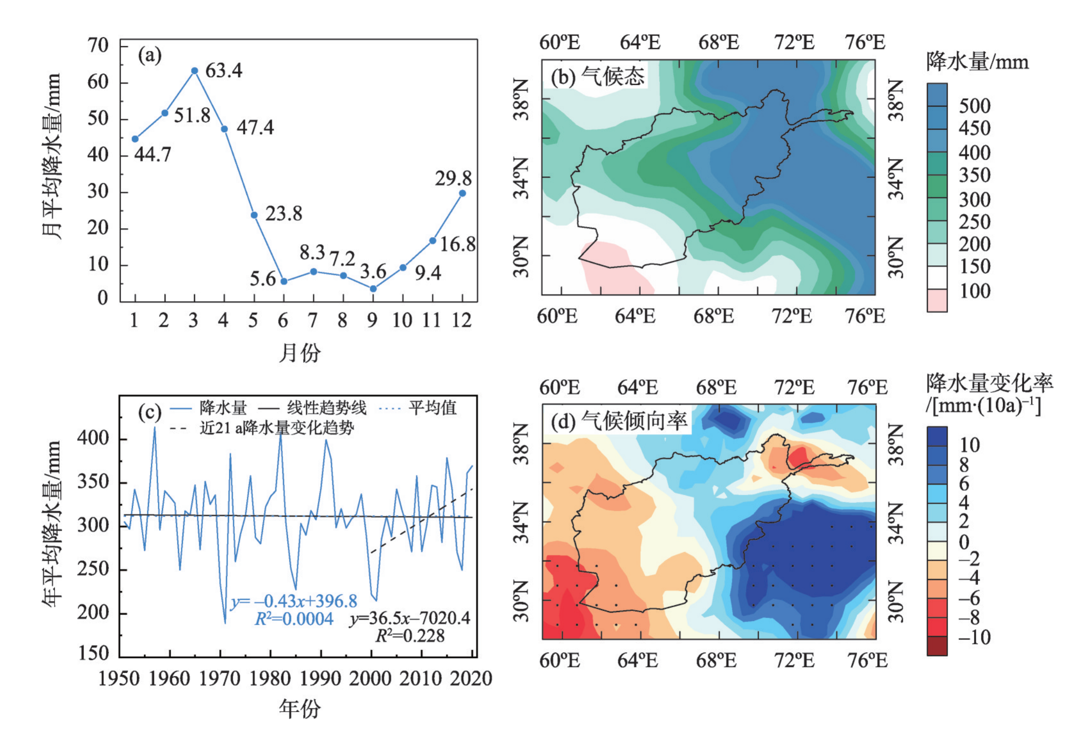


图4 1951—2020年阿富汗平均降水量月(a)、年际(c)变化以及其气候态(b)和气候倾向率(d)的空间分布

Fig. 4 Annual cycle (a) and interannual (c) variations and the spatial distribution of the annual average (b), trend (d) i precipitation in Afghanistan from 1951 to 2020

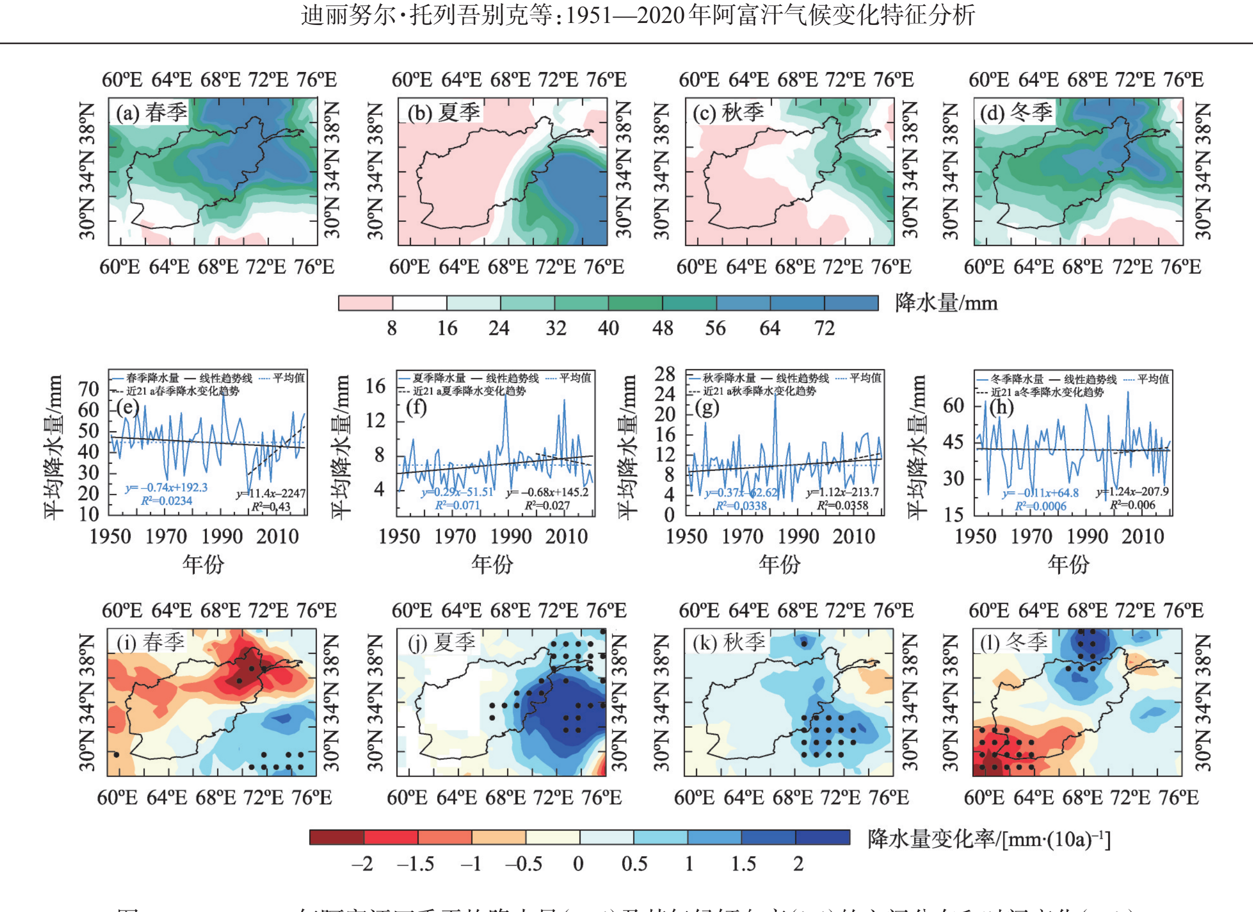


图5 1951—2020年阿富汗四季平均降水量(a~d)及其气候倾向率(i~l)的空间分布和时间变化(e~h)

Fig. 5 Spatial distribution of seasonal average (a-d), trends (i-l), and temporal variations (e-h) of precipitation in Afghanistan from 1951 to 2020

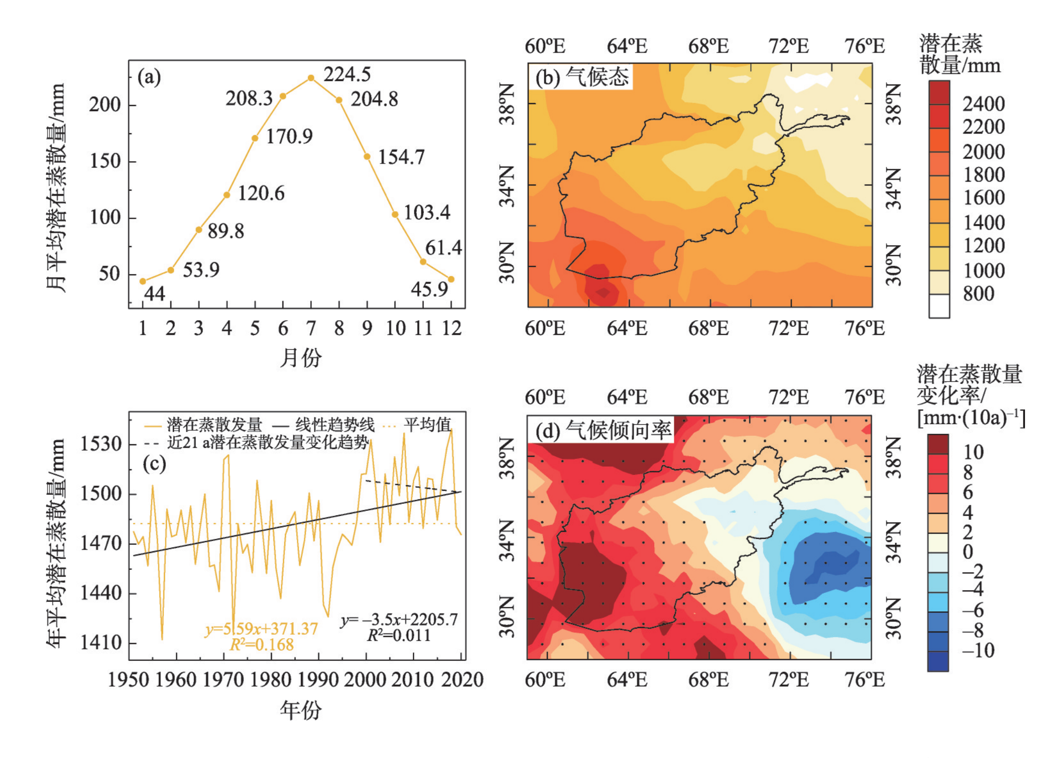


图6 1951—2020年阿富汗平均潜在蒸散量月(a)、年际(c)变化以及其气候态(b)和气候倾向率(d)的空间分布

Fig. 6 Annual cycle (a) and interannual (c) variations and the spatial distribution of the annual average (b), trend (d) of potential evapotranspiration in Afghanistan from 1951 to 2020

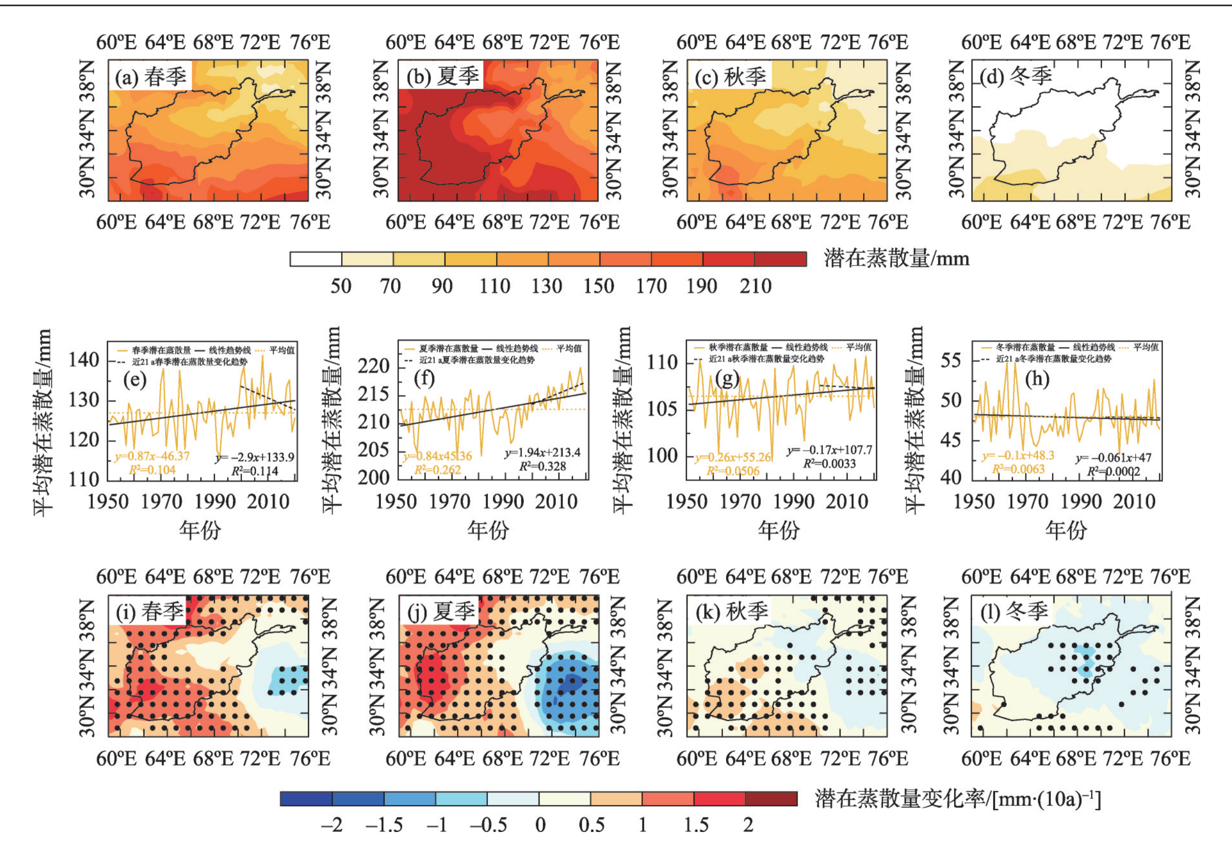


图7 1951—2020年阿富汗四季平均潜在蒸散量(a~d)及其气候倾向率(i~l)的空间分布和时间变化(e~h)

Fig. 7 Spatial distribution of seasonal average (a-d), trends (i-l), and temporal variations (e-h) of potential evapotranspiration in Afghanistan from 1951 to 2020

量气候倾向率的空间分布(图6d)可以看出,阿富汗西南部潜在蒸散量呈显著增加趋势,其增加幅度超过12 mm·(10a)$^{-1}$;东部山区潜在蒸散量呈减少趋势。

1951—2020年阿富汗四季平均潜在蒸散量的空间分布均呈自西南部向东北部递减(图7a~图7d),夏季潜在蒸散量最大,且西南部局部大于210 mm(图7a);冬季潜在蒸散量最小(图7d)。近70 a,春、夏季和秋季潜在蒸散量呈显著增加趋势,分别增加0.87 mm·(10a)$^{-1}$、0.84 mm·(10a)$^{-1}$和0.26 mm·(10a)$^{-1}$,且均通过95%水平的显著性检验,其中春季潜在蒸散量的变化幅度最大。冬季潜在蒸散量呈下降趋势,其气候倾向率为-0.1 mm·(10a)$^{-1}$。21世纪以来,春、秋季和冬季潜在蒸散量呈减少趋势,夏季呈增加趋势。图7i~图7l为阿富汗潜在蒸散量四季变化趋势的空间分布,春、夏季阿富汗全区潜在蒸散量呈增加趋势,且西部地区增加趋势显著(通过95%水平的显著性检验);秋季阿富汗西南部地区潜在蒸散量呈略增加趋势,东北部呈减少趋势;冬季阿富汗大部分地区潜在蒸散量呈减小趋势。

2.4 干湿指数(AI)变化特征

1951—2020年阿富汗平均AI指数的年内分布存在明显的季节差异,春、冬(夏、秋)季AI指数大(小),气候较为湿润(干旱)(图8a)。阿富汗AI指数的空间分布表现为东北部大于西南部(图8b)。依据AI划分干湿气候的标准,阿富汗西南部为干旱气候区,中部为半干旱气候区,东北部的中部为干旱半湿润气候区,东北部的东部为湿润气候区。近70 a,阿富汗年平均干湿指数呈略增加的趋势(图8c)。2000年以来,干湿指数表现为显著的增加趋势,其气候倾向率为0.04·(10a)$^{-1}$(通过95%水平的显著性检验)。阿富汗年平均AI变化趋势的空间分布表现为自西南部向东北部,呈"减小-增加-减小"的空间分布(图8d),表明西南部的干旱区干旱化加剧,中部的干旱-半湿润地区呈湿润化,而东北部的湿润区呈干旱化。

阿富汗四季平均AI指数的空间差异较大(图9a~图9d),春季在阿富汗大部分区域呈现出湿季特征,且自西南向东北呈逐渐偏湿的分布(图9a);夏

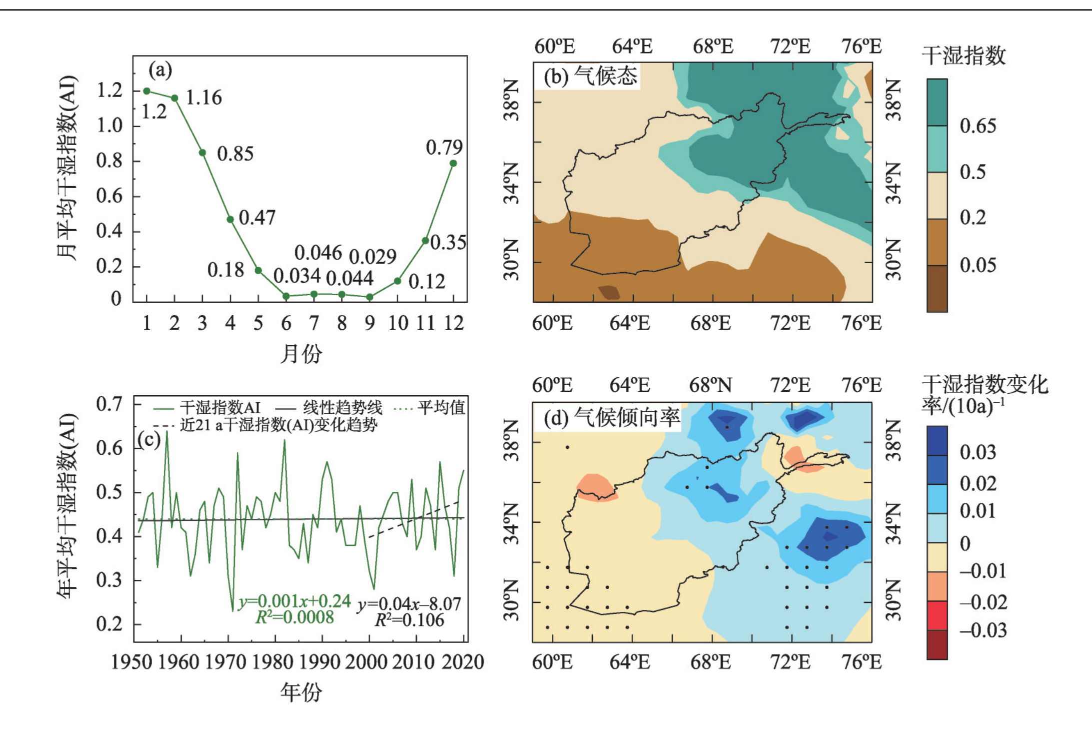


图8 1951—2020年阿富汗平均干湿指数(AI)月(a)、年际(c)变化以及其气候态(b)和气候倾向率(d)的空间分布

Fig. 8 Annual cycle (a) and interannual (c) variations and the spatial distribution of the annual average (b), trend (d) of Aridity index (AI) in Afghanistan from 1951 to 2020

季阿富汗为极端干旱和干旱的状态，仅东南部小部分区域为干旱半湿润状态(图9b)；秋季阿富汗干旱程度自西南部至东北部减缓；冬季阿富汗东北部大部分地区为干旱-半湿润和湿润状态(图9d)，冬季降水量多且潜在蒸散量小，使得阿富汗冬季气候较为湿润。由1951—2020年阿富汗四季干湿指数的时间变化(图9e~图9h)可以看出，春季AI呈减小趋势[-0.01·$(10a)^{-1}$]，表明阿富汗在春季呈干旱化。夏季AI呈显著的增加趋势，秋、冬季AI变化幅度不大。21世纪以来，AI在春季表现为显著增大趋势，其增幅为0.13·$(10a)^{-1}$；其次为冬季，近21 a以来增湿幅度为0.041·$(10a)^{-1}$；秋季也呈增湿趋势，气候倾向率为0.027·$(10a)^{-1}$；夏季AI呈减小趋势，气候倾向率为- 0.004·$(10a)^{-1}$。四季平均AI指数变化的空间差异较大(图9i~图9l)。春季(图9i)阿富汗整体表现为偏干的趋势，东北部偏干幅度最大。夏季阿富汗AI指数西部呈略下降趋势，气候偏干；东部呈上升趋势，气候倾向率介于0~0.01·$(10a)^{-1}$，气候偏湿。秋季为阿富汗的旱季，AI指数在全区呈现上升趋势(图13k)，表明秋季阿富汗有变湿倾向。冬季阿富汗AI指数变化存在明显的空间异质性，其与年平均AI指数变化的空间分布型类似，自西南向东北呈"减小-增加-减小"的变化趋势。西南部AI指数的气候倾向率小于-0.02·$(10a)^{-1}$，呈显著的偏干趋势，东北部的西部AI指数的气候倾向率大于0.03·$(10a)^{-1}$，呈偏湿趋势，东北部的东部AI指数的气候倾向率小于- 0.01·$(10a)^{-1}$，呈偏干趋势。

3 结 论

本文基于最新CRU逐月气候要素资料，对1951—2020年阿富汗平均气候变化开展全面分析，得出以下主要结论：

(1) 1951—2020年阿富汗年平均气温和潜在蒸散量(降水量)表现为自西南部锡斯坦盆地向东北部呈递减(递增)的分布，东北部瓦罕走廊为阿富汗年平均气温最低、年降水最集中的高寒地区。近70 a以来，阿富汗呈全区一致性的显著增温，年降水量总体略呈减少趋势，而潜在蒸散量呈显著增加的趋势。区域间降水变化差异大，表现为阿富汗西南部和东北部减少，中部山区增加的趋势。21世纪以来，阿富汗表现为增温平缓，降水量显著增加，而潜在蒸散量略减小的变化。

(2) 近70 a以来，阿富汗四季增温显著，均呈现西部地区增温幅度大于东部的特征，且春季增温幅

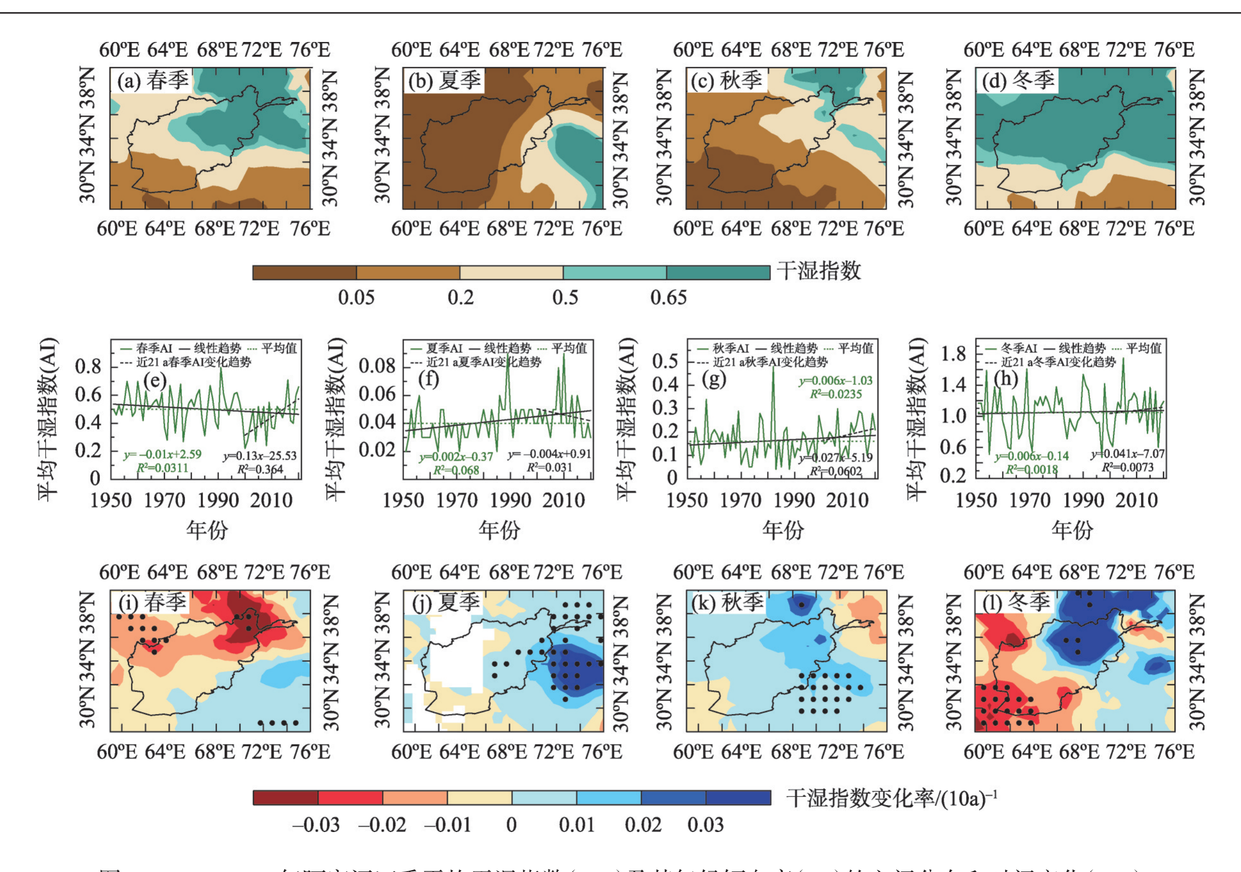


图9　1951—2020年阿富汗四季平均干湿指数(a~d)及其气候倾向率(i~l)的空间分布和时间变化(e~h)

Fig. 9　Spatial distribution of seasonal average (a-d), trends (i-l), and temporal variations (e-h) of Aridity index (AI) in Afghanistan from 1951 to 2020

度最大。春、冬(夏、秋)季降水为减少(增加)趋势,春季阿富汗北部大部分区域降水量减少,南部略增加,冬季自西南至东北部呈“减少-增加-减少”的变化趋势。春、夏、秋季潜在蒸散量增加,而冬季表现出略减小趋势。21世纪以来,气候特征变化明显,表现为春季和秋季气温和潜在蒸散量均减小、降水增加;夏季气温和潜在蒸散量增大,降水减少;冬季气温和降水量增加,潜在蒸散量减小的变化。

(3) 近70 a以来,年平均AI指数变化不明显,以年际变化为主。空间上表现为自西南至东北部为“干-湿-干”的变化,兴都库什山区呈现增湿趋势。春季AI指数在阿富汗全区呈减小趋势,表明春季气候偏“暖干”;夏、秋、冬季AI指数呈增加趋势,且冬季自阿富汗西南向东北呈“减小-增加-减小”的变化趋势。21世纪以来,阿富汗年平均AI指数呈显著增加趋势,并且在春、秋季和冬季也表现一致,而夏季呈变干趋势。

近70 a,阿富汗四季气温呈一致的增暖,季节降水的区域差异特征明显,降水集中季节(冬、春季)降水量时间变化呈减少趋势,但在空间上变化不均,春季(冬季)中部山区气候表现为“暖干化”(“暖湿化”),瓦罕走廊在湿季均为“暖干化”。兴都库什山山区增暖,会带来冰雪融化加速、冰崩、冰川消融等生态和冰冻圈灾害事件,对山区及下游补给河流带来风险。西南部锡斯坦盆地气候“暖干化”趋势持续,将对农业生产和邻国水资源协调发展带来威胁。

本文仅采用长时间序列的格点资料分析了阿富汗气候要素变化的基本特征,然而对于极端气候事件的发生、21世纪以来阿富汗春季降水急剧增加的成因机制及未来气候变化对阿富汗区域以及与之毗邻的我国新疆水资源和生态环境可能产生的影响需进一步加强研究。

参考文献(References):

[1] 王会军. 气候变化研究与环境和发展问题紧密相扣[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1027-1028. [Wang Huijun. Climate change research in closely linked to environmental and development issues [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(10): 1027-1028.]

[2] IPCC. Summary for Policy Makers of Climate Change 2021: The

Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[3] 姜大膀, 王娜. IPCC AR6报告解读: 水循环变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 699-704. [Jiang Dabang, Wang Na. Water cycle changes: Interpretation of IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 699-704.]

[4] National Environmental Protection Agency and United Nations Environment Programme[R]. Afghanistan: Climate Change Science Perspectives. Kabul, 2016.

[5] Surma J, Assonov S, Bolourchi M J, et al. Triple oxygen isotope signatures in evaporated water bodies from the Sistan Oasis, Iran[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42: 8456-8462.

[6] Sharifikia M. Environmental challenges and drought hazard assessment of Hamoun Desert Lake in Sistan region, Iran, based on the time series of satellite imagery[J]. Natural Hazards, 2013, 65: 201-217.

[7] United Nations Environment Programme (UNEP). History of Environmental Change in the Sistan Basin[R]. UNEP, Geneva, Switzerland, 2006.

[8] Rehana S, Reddy P K, Reddy N S B, et al. Observed Spatio-Temporal Trends of Precipitation and Temperature Over Afghanistan. In book: Climate Change Impacts on Water Resources[M]. Water Science and TechnologyLibrary, Spring Cham, 2021: 98.

[9] Aliyar Q, Dhungana S, Shrestha S. Spatio-temporal trend mapping of precipitation and its extremes across Afghanistan (1951-2010)[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2022, 147: 605-626.

[10] Yao J Q, Mao W Y, Chen J, et al. Recent signal and impact of wet-to-dry climatic shift in Xinjiang, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31: 1283-1298.

[11] Qutbudin I, Shiru M S, Sharafati A, et al. Seasonal drought pattern changes due to climate variability: Case study in Afghanistan[J]. Water, 2019, 11: 1096.

[12] Peterson T C, Vose R S. An overview of the global historical climatology network temperature database[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(12): 2837-2849.

[13] Menne M J, Williams C N, Gleason B E, et al. The global historical climatology network monthly temperature dataset, Version 4 [J]. Journal of Climate, 2018, 31(24): 9835-9854.

[14] Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset[J]. Scientific Data, 2020, 7: 109, doi:10.1038/s41597-020-0453-3.

[15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998: 15-86.

[16] 闫昕旸, 张强, 张文波, 等. 泛中亚干旱区气候变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 1-11. [Yan Xinyang, Zhang Qiang, Zhang Wenbo, et al. Analysis of climate characteristics in the Pan-Central-Asia arid region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 1-11.]

[17] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1647-1657. [Chen Fahu, Huang Wei, Jin Liya, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2011, 41(11): 1647-1657.]

[18] 于志翔, 于晓晶, 杨帆. 近40 a中巴经济走廊气候变化时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 695-703. [Yu Zhixiang, Yu Xiaojing, Yang Fan. Spatio-temporal characteristics of climate change in China-Pakistan Economic Corridor from 1980 to 2019 [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 695-703.]

[19] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 894-904. [Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinhong, et al. An overview of China climate change over the 20th Century using UK UEA/CRU high resolution grid data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 894-904.]

[20] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于CRU资料的中亚地区气候特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396-403. [Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing. Climatic characteristics in Central Asia based on CRU data [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 396-403.]

[21] 张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于SPEI指数的中亚地区干旱时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 282-290. [Zhang Leyuan, Wang Yi, Chen Yaning. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Central Asia based on SPEI index[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 282-290.]

[22] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 333-346. [Yao Junqiang, Li Moyan, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. The assessment on "warming-wetting" trend in Xinjiang at multi-scale during 1961-2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 333-346.]

[23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]

[24] Huang J P, Ji M X, Xie Y K, et al. Global semi-arid climate change over last 60 years[J]. Climate Dynamics, 2016, 46: 1131-1150.

[25] 程善俊, 梁苏洁. 基于3种指数的全球干湿变化年代际特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(2): 176-184. [Cheng Shanjun, Liang Sujie. Interdecadal characteristics of global dry-wet variation based on three indexes[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(2): 176-184.]

[26] Tuoliewubieke D, Yao J Q, Chen J, et al. Regional Drying and wetting trends over Central Asia based on Köppen climate classification in 1961-2015[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(3): 363-372.

[27] UN(United Nations). United Nations Convention to Combat Desertification[R]. Geneva, Switzerland, 1994.

[28] Stockholm Environment Institute. Socio-Economic Impacts of Climate Change in Afghanistan[R]. Stockholm Environment Institute, Stockholm, 2009.

[29] 史继清, 豆永丽, 杨霏云, 等. 西藏地区潜在蒸散量时空格局特征及影响因素研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 724−732. [Shi Jiqing, Dou Yongli, Yang Feiyun, et al. Temporal and spatial pattern characteristics of potential evapotranspiration in Tibet and its influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 724−732.]

Spatiotemporal characteristics of climate change in Afghanistan from 1951 to 2020

Dilinuer TUOLIEWUBIEKE, YAO Junqiang, MAO Weiyi, LI Shujuan,
CHEN Jing, MA Liyun

(Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration/Key Laboratory of Tree-Ring Physical and Chemical Research, China Meteorological Administration/Xinjiang Key Laboratory of Tree-Ring Ecology, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: The fragile ecosystems of Afghanistan, in the southern arid region of Central Asia, are greatly affected by climate change. In this study, we systematically analyzed the change in the average climate of Afghanistan from 1951 to 2020, in terms of both temporal and spatial patterns, using updated CRU TS V4.05 high-resolution gridded data. Results indicate that the extremely arid, arid, semihumid, and humid climate zones of Afghanistan are distributed from the southwest to the northeast. The annual average air temperature and potential evapotranspiration decreased from the Sistan Basin in the southwest to the Wakhan Corridor in the northeast. By contrast, the annual average precipitation increased. The annual and seasonal average temperature increased consistently, with the most substantial warming over the past 70 years occurring in the western part of Afghanistan; the greatest increase in the seasonal average temperature was in the spring. The data indicated strong spatial heterogeneity in precipitation as well as large seasonal differences. There was a slight decrease in the annual precipitation [−0.43 mm·$(10a)^{-1}$] over the study period and a “decrease-increase-decrease” trend in the spatial distribution changes, from the southwest to the northeast. The precipitation was concentrated in winter and spring. From 1951 to 2020, the trend in the potential evapotranspiration in Afghanistan was a significantly upward trend, with a rate of 5.59 mm·$(10a)^{-1}$. Annual potential evapotranspiration was found to have decreased over the central region of Afghanistan. Although there were seasonal differences, potential evapotranspiration tended to increase in the spring, summer, and autumn and decrease in the winter. Analysis of the aridity index (AI) revealed interannual variations in the climate of Afghanistan. Drought had intensified in the extremely arid Sistan Basin in the southwest, whereas warmer and wetter weather occurred in the central Hindu Kush region, and the Wahan Corridor area was generally warmer and dryer. The average AI decreased substantially in the spring, leading to the risk of staged drought. Generally, since the beginning of the 21st century, Afghanistan has experienced a slight increase in temperature, a sharp increase in precipitation, and a significant decrease in annual potential evapotranspiration. The region experienced warming and wetting stages, most notably in the spring. In conclusion, all of these changes pose risks and challenges to agricultural production, the cryosphere, and water management.

Keywords: Afghanistan; warming-wetting; aridity index; Sistan Basin; Wakhan Corridor